

# 云南腾冲膨胀性硅藻土的发现及其工程地质意义\*

张永双<sup>①②</sup> 郭长宝<sup>①②</sup> 曲永新<sup>③</sup> 张明<sup>④</sup>

(①国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室 北京 100081)

(②中国地质科学院地质力学研究所 北京 100081)

(③中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

(④中国地质大学工程学院 武汉 430074)

**摘要** 结合在建的云南保山—腾冲高速公路沿线及周边地区典型地质剖面观测和多种室内试验手段测试,揭示了腾冲芒棒盆地的硅藻土是以硅藻为主、富含黏土矿物的黏土质硅藻土,属于一种轻质强膨胀性极软岩。其具有典型硅藻土与膨胀性黏土岩双重物理和水理性质,前者表现为极高的孔隙性、高吸水性、极强的结构性;后者则表现为高塑性、显著的膨胀崩解性,而且膨胀崩解特性的显现与有机质含量密切相关。腾冲芒棒盆地膨胀性硅藻土的发现及其工程地质特性的研究,有助于加深对保山—腾冲高速公路沿线地质灾害形成机理的认识,对揭示中国西南地区某些湖相地层工程特性及地质灾害多发原因也具有重要的启示意义。

**关键词** 黏土质硅藻土 膨胀性 上新世 芒棒盆地 保山—腾冲高速公路

中图分类号:P642 文献标识码:A

## DISCOVERY OF SWELLING DIATOMITE AT TENGCHONG, YUNNAN PROVINCE AND ITS IMPLICATION IN ENGINEERING GEOLOGY

ZHANG Yongshuang<sup>①②</sup> GUO Changbao<sup>①②</sup> QU Yongxin<sup>③</sup> ZHANG Ming<sup>④</sup>

(①Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, MLR, Beijing 100081)

(②Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081)

(③Institute of geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

(④Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

**Abstract** This paper was based on the field investigation of the typical geological sections and multiple methods of laboratory tests on the samples from the slopes along the Baoshan-Tengchong highway and adjacent area in Yunnan Province. It discovered a swelling clayey diatomite in the Neogene lacustrine strata, named Mangbang formation, at Tengchong area Yunnan Province. The clayey diatomite is belonging to a type of both light and strong swelling rock, which has double physical-hydraulic properties of both typical diatomite and swelling clay rock. The former include high porosity, high water absorption capacity, and very strong structure, the later include high plasticity, outstanding swelling and disintegration properties, and the appearance of swelling property mainly connected with the contents of organic matter. The discovery of the swelling clayey diatomite in Mangbang Basin, as well as the researches on its engineering properties, is not only instructive for realization of the mechanism of related geo-hazards

\* 收稿日期: 2011-10-20; 收到修改稿日期: 2012-02-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072269), 科技基础性工作专项(2011FY110102)和铁道部科技开发计划项目(2008G027-B)资助.

第一作者简介: 张永双, 主要从事工程地质与地质灾害研究工作. Email: zhys100@sohu.com

along the Baoshan-Tengchong high way, but also helpful to understanding the engineering properties of some lacustrine deposits and their easily causing geo-hazards in southwestern China.

**Key words** Clayey diatomite, Swelling, Neogene, Mangbang Basin, Baoshan-Tengchong high way

## 1 引言

硅藻土通常是湖沼或海洋环境下形成的生物化学沉积,属于硅质岩类( $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ),最老的硅藻土可见于白垩系和上侏罗统<sup>[1~3]</sup>,但更多的发育在古近纪、新近纪和第四纪地层中。中国是世界上硅藻土矿分布最广的国家之一,全国已有 18 个省区发现有硅藻土矿,主要分布在东部玄武岩分布区和云南、四川一带<sup>[2,3]</sup>。无论是非金属矿物材料开发利用还是工程地质和岩土工程应用,硅藻的含量是硅藻土分类的基础。广义硅藻土系列的通用分类方案为: I-硅藻土,硅藻含量 $\geq 90\%$ ; II-含黏土硅藻土,硅藻含量 $90\% \sim 75\%$ ; III-黏土质硅藻土,硅藻含量 $75\% \sim 50\%$ ; VI-硅藻黏土,硅藻含量 $50\% \sim 25\%$ ; V-含硅藻黏土,硅藻含量 $< 25\%$ 。显然, I、II、III类硅藻土是工业矿物材料开发利用的主要对象,而后 2 类除了作为土壤改良剂、沙漠治理剂、污水处理领域的应用外,在工程地质、岩土工程和地质灾害研究中因其不良的工程特性,成为特别需要关注的对象。

以往研究表明,虽然形成于不同地质时代的硅藻土都具有高孔隙性特征,但固结和胶结作用仍有显著差别。中新世、上新世硅藻土具有弱成岩特点,其单轴抗压强度通常 $\geq 1.0 \text{ MPa}$ ,属极软岩系列;而第四纪硅藻土尚未成岩,属于土体。国内外一些学者曾对硅藻土的工程特性进行过相关研究,Day (1995)研究了分布在美国南加州用于填土的硅藻土的工程特性,其具有很高的含水量和很低的干密度<sup>[4]</sup>; Tateishi (1997)对日本天然硅藻土的研究结果表明,其尽管具有很高的天然含水量,但强度和弹性模量都很高<sup>[5]</sup>;国内的相关研究主要涉及硅藻土的微观特征<sup>[6]</sup>、硅藻土的孔隙空间分布与强度变形特性<sup>[7]</sup>、硅藻土滑坡及边坡稳定性<sup>[8]</sup>等。但是,关于硅藻土膨胀性问题的研究至今未见相关报道。作者在云南腾冲地区工程地质调查中,在上新世芒棒组( $N_2m$ )湖相地层中发现了具有膨胀性的黏土质硅藻土,其干燥后不仅可漂浮在水上,而且具有显著的膨胀崩解现象,属于一种轻质强膨胀性极软岩。在以往国内外关于膨胀性岩土地质成因类型的文

献<sup>[9,10]</sup>中均未见到相关阐述,因此该类膨胀性硅藻土的发现及进一步研究具有重要的工程地质意义。

## 2 腾冲上新世硅藻土的发育特征

### 2.1 上新世硅藻土的分布

滇西南腾冲地区的上新世硅藻土主要产于芒棒组( $N_2m$ )湖相地层中<sup>[3]</sup>,在芒棒组第三段( $N_2m^3$ )中尤其发育。芒棒组在龙川江芒棒、腾冲、梁河等盆地中具有广泛分布,沉积物以含砾花岗质砂、砂砾层、黏土质硅藻土、褐煤层夹玄武岩、火山角砾岩、凝灰岩多个火山喷发-沉积旋回为特征,厚 $352 \sim 630 \text{ m}$ 。在芒棒盆地,黏土质硅藻土主要出露于曲石、永安、

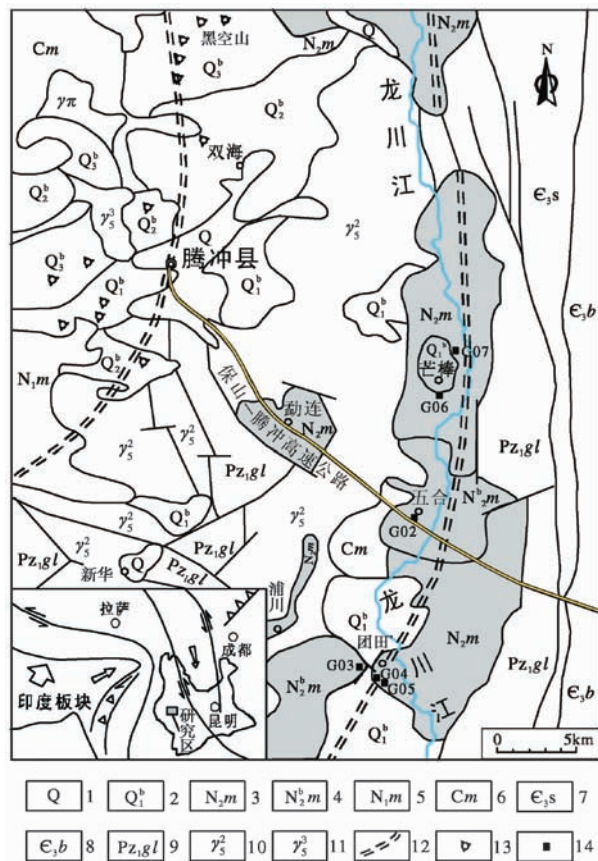


图 1 芒棒组硅藻土分布示意图

Fig. 1 Distribution of diatomite in Mangbang formation

1. 第四纪沉积;
2. 第四系火山岩;
3. 上新统芒棒组;
4. 上新统芒棒组火山岩;
5. 中新统南林组;
6. 石炭系勐洪组;
7. 寒武系沙河厂组;
8. 寒武系保山组;
9. 下古生界高黎贡山群;
10. 燕山晚期花岗岩;
11. 燕山早期花岗岩;
12. 区域构造带;
13. 火山口;
14. 取样点

勐连、三甲街、芒棒、上营等地(图1)。

研究表明<sup>[11]</sup>,腾冲上新世硅藻土的空间分布明显受两方面因素的控制,一是沉积盆地中通常有新生代玄武岩的分布,这些玄武岩在暖湿气候条件下的化学风化作用向沉积盆地中提供了丰富的游离 $\text{SiO}_2$ 和大量 $\text{Mg}^{2+}$ 的补给,有利于伴生的泥质沉积物中蒙脱石或伊利石/蒙脱石等混层矿物的形成,这是硅藻土的成因原因。二是腾冲地区硅藻土的分布明

显受构造带控制,龙川江断裂带控制了芒棒、团田、蒲川等地硅藻土的分布和赋存状态(图1)。

## 2.2 典型剖面

在沉积剖面中,硅藻土既可与玄武岩、黏土层、褐煤(泥炭)伴生或互层,也可以单独成层。以下着重介绍保山—腾冲高速公路沿线及周边地区观测到的典型地质剖面特征(图2):

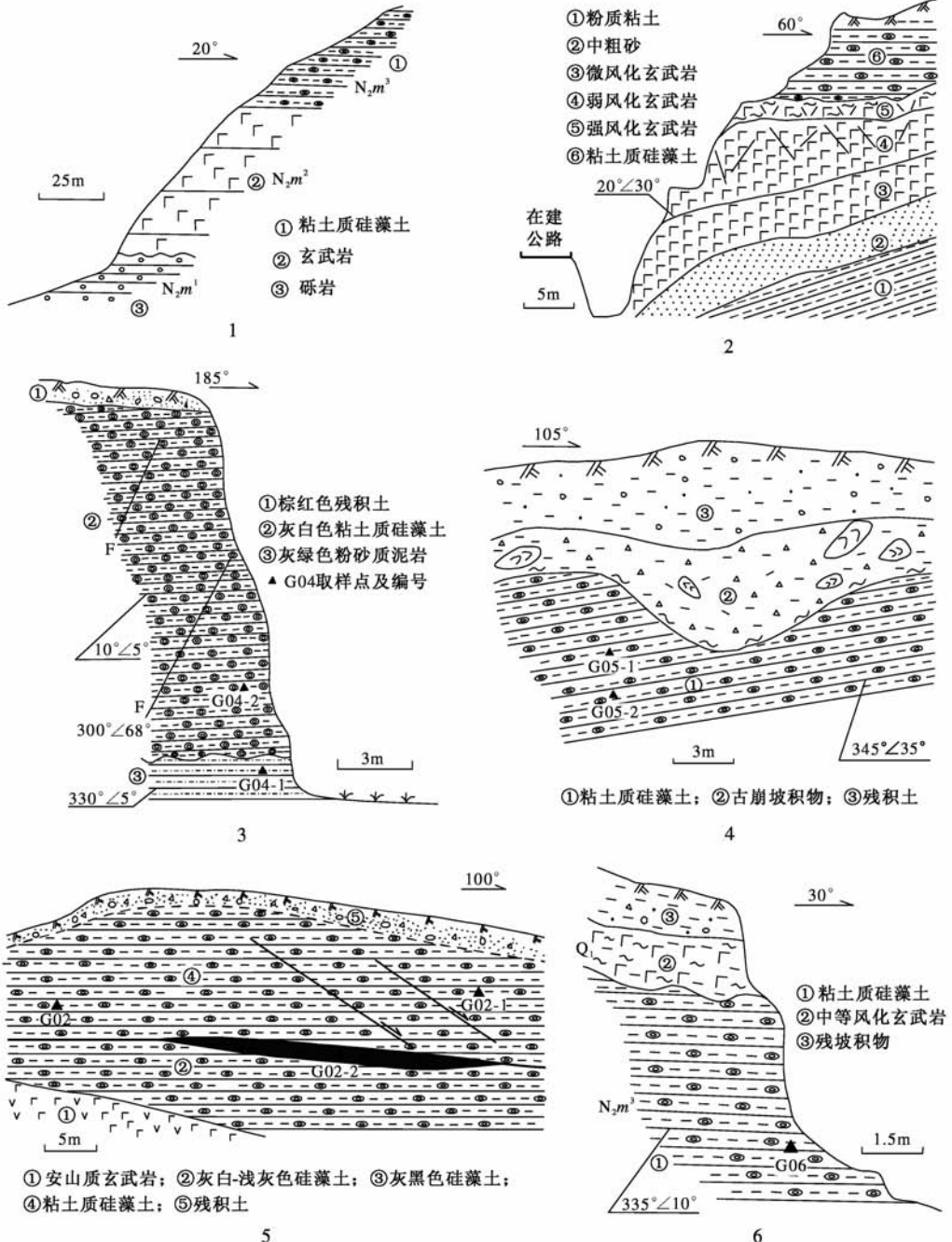


图2 腾冲地区典型硅藻土边坡剖面图

Fig. 2 Typical diatomite slope sections in Tengchong area

1. 团田乡洞弄坡地质剖面图; 2. 团田乡蛮帕村北公路边坡; 3. 团田乡曼弄村蛮帕硅藻土矿剖面;
4. 团田乡曼弄村公路边坡; 5. 五合乡驻地南侧公路硅藻土剖面; 6. 芒棒乡驻地南公路边坡剖面

### 2.2.1 团田乡洞弄坡剖面

剖面位于龙川江的右岸,斜坡上部为芒棒组上段( $N_2m^3$ ),中部为芒棒组中段厚层火山熔岩( $N_2m^{2b}$ ),底部为芒棒组下段弱胶结砾岩层( $N_2m^1$ )。上部硅藻土为灰-灰白色,总体呈厚层状,但纹层发育,厚度大于40m(图2-1)。在坡脚可见硅藻土风化崩落的碎屑。

### 2.2.2 团田乡蛮帕村公路边坡

在建公路开挖路堑于 $N_2m^3$ 玄武岩及硅藻土分布区的缓丘之间,边坡高约40m(图2-2)。剖面中下部为玄武岩及粗砂层,边坡分为两级,中间平台高10~12m;剖面上部为厚约10m的黏土质硅藻土,产状 $20^\circ \angle 30^\circ$ ,风干后干裂、易崩落。下伏玄武岩风化呈圆球状,与硅藻土接触带存在古风化壳,呈黏土状,易构成隔水层,影响边坡稳定。

### 2.2.3 团田乡曼弄村蛮帕硅藻土矿剖面

该剖面位于腾冲地区最大的硅藻土矿区(已闭坑),剖面出露厚层灰白色硅藻土矿层(图2-3),自上而下可分出:①表层残积土,厚2.7m;②厚层硅藻土,产状 $10^\circ \angle 5^\circ$ ,厚14.6m,其中发育陡倾的小断层;③厚层灰-灰绿色粉砂质泥岩,厚度大于0.8m,未见底,近水平、略起伏,与上覆硅藻土层呈不整合接触。

### 2.2.4 团田乡曼弄村公路边坡

在建公路开挖边坡(图2-4),剖面中下部为中厚层状灰白色黏土质硅藻土,产状 $345^\circ \angle 18^\circ$ ,干燥后易龟裂、崩落碎屑于坡脚。因含生物碎屑,纹层间出现锈状斑纹。现场测量表明,表层残积土,厚3m;中部古崩坡积物,最厚处达5m;下部黏土质硅

藻土,厚度大于4m,未见底。据现场施工人员介绍,开挖初期边坡出现膨胀性滑坡,将挡墙挤倒。

### 2.2.5 五合乡驻地南侧公路硅藻土剖面

在五合乡驻地南北向公路西侧边坡,出露 $N_2m^3$ 黏土质硅藻土剖面(图2-5)。在表层厚约1.1m的残积土之下,为厚层灰白-浅绿色黏土质硅藻土,厚12.2m,产状 $20^\circ \angle 25^\circ$ ;其中含小型正断层,产状 $45^\circ \angle 50^\circ$ 。剖面中部夹灰黑色硅藻土透镜体,最厚处达0.8m。在剖面左下方出露玄武质安山岩,气孔发育,出露厚度4.2m。黏土质硅藻土有明显的干燥收缩裂隙及风化剥落现象。

### 2.2.6 芒棒乡驻地南公路边坡

在芒棒乡驻地南公路边坡(图2-6),剖面下部厚层硅藻土厚度大于8m(未见底),天然状态呈淡黄色、致密、可塑,纹理不明显;中上部为中等风化的玄武岩,厚约1.5m;表层为2.5m的残积风化层。黏土质硅藻土中节理裂隙较发育。

### 2.2.7 芒棒乡张家村公路边坡

龙川江右岸公路边坡由 $N_2m^3$ 厚层淡黄色黏土质硅藻土构成,表层残积土厚约1.5m,黏土质硅藻土厚约7.0m,呈致密块状、缺少层理,节理较发育。

## 3 物质组成和微观结构特征

### 3.1 硅藻土的物质组成

#### 3.1.1 粒度组成特征

根据移液管全分散法粒度分析结果(表1),芒棒盆地硅藻土粒径 $>0.075\text{mm}$ 的砂粒含量通常 $<1\%$ ,个别达6.94%; $0.075 \sim 0.01\text{mm}$ 粗粉粒含量

表1 腾冲地区硅藻土物质组成测试结果

Table 1 Test results of diatomite composition from Tengchong area

样品编号	位置	颗粒组成/(%)					$\text{SiO}_2$ /(%)	有机质/(%)	$\text{CaCO}_3$ /(%)	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
		0.25 ~ 0.075mm	0.075 ~ 0.01mm	0.01 ~ 0.005mm	$<0.005\text{mm}$	$<0.002\text{mm}$				
G02		6.94	47.46	45.60	31.04	56.01	0.29	0.14	269.00	
G02-1	五合乡驻地南公路边坡	0.05	35.07	9.96	54.92	37.08	56.45	0.15	0.21	291.97
G02-2		0.01	42.15	11.64	46.20	32.40	56.55	4.42	0.51	397.14
G04-2	团田乡蛮帕硅藻土矿	0.06	37.42	13.02	49.48	34.88	56.35	1.93	0.31	224.51
G05-1	团田乡曼弄	0.14	45.46	4.04	50.16	46.16	50.00	0.16	0	242.68
G05-2	保腾高速	0.30	35.15	13.00	51.56	31.72	54.69	0.23	0	291.48
G06	芒棒南公路边取土坑	0.06	57.18	2.28	40.48	35.68	61.72	0.10	0.67	196.20
G07	芒棒乡张家村公路边坡	0.02	41.14	8.72	50.12	33.92	64.76	0.08	0.23	171.70

35.15%~57.18%, 平均 41.93%; 0.01~0.005mm 细粉粒含量 2.28%~13.02%, 平均 8.95%; 粗细粉粒构成硅藻土的骨架。<0.005mm 粗黏粒含量 40.48%~54.92%, 平均 48.57%; <0.002mm 细黏粒(胶粒)含量 31.04%~46.16%, 平均 33.36%。扫描电子显微镜(SEM)观察表明,最小的硅藻碎屑直径可小至 2~3 $\mu\text{m}$ ,由于非自生的黏土矿物粒径 <2 $\mu\text{m}$ ,因此细黏粒即胶粒含量可以作为黏土矿物的总量。采用乙二醇乙醚吸附法测得的硅藻土比表面积值很高,多介于 200~300 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,最大可达 397.14 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ,表明所研究的硅藻土具有高分散性。可见,腾冲芒棒盆地的硅藻土实际上是以硅藻为主富含黏土矿物的黏土质硅藻土。

### 3.1.2 矿物成分的 X-射线衍射分析

采用 3 种样品处理方法对 <2 $\mu\text{m}$  黏粒定向片进行黏土矿物 X-射线衍射定量测试表明(表 2, 图 3),天然硅藻土黏土矿物中虽然均含有伊利石/蒙脱石混层矿物、伊利石、高岭石 3 种黏土矿物,但伊/蒙混层矿物不仅混层比高(50%~65%)且相对含量也占很高的比例(33%~74%),是影响黏土质硅藻土膨胀特性的主要因素。值得注意的是,遭受风化的硅藻土中的伊/蒙混层矿物含量较低、高岭石含量较高。

### 3.1.3 岩石化学成分

采用岩石化学方法对腾冲 8 个样品进行了  $\text{SiO}_2$  含量测试(表 1),对五合乡硅藻土进行了全量化学成分测试并与国内外硅藻土化学分析结果对比(表 3),芒棒盆地硅藻土的硅藻含量与浙江嵊县和阿尔及利亚硅藻土相当,略高于云南寻甸硅藻土,而远远低于吉林长白、抚松及美国硅藻土<sup>[2, 12]</sup>。

## 3.2 黏土质硅藻土的微结构特征

扫描电子显微镜观察表明,较完整的硅藻残骸有多种形态,以圆筒状为主,尚有圆盘状、肋骨状等

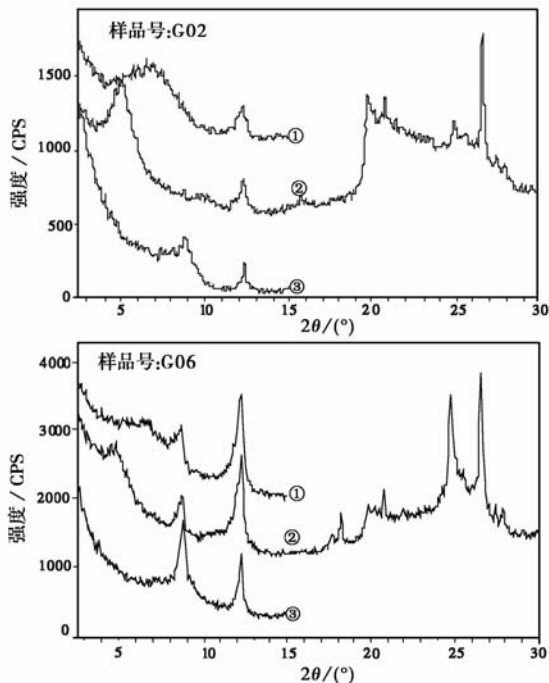


图 3 黏土质硅藻土 <2 $\mu\text{m}$  粒组 X-射线衍射曲线图  
Fig. 3 X-ray diffraction analysis charts of the <2 $\mu\text{m}$  fraction of clayey diatomite

(图 4),所有硅藻残骸壁面均密集分布极为细小的圆孔(孔径 <0.2 $\mu\text{m}$ ),加之硅藻残骸的混杂堆积,形成了硅藻土极高孔隙性、极低密度的结构特征。同时,非晶质游离  $\text{SiO}_2$ (蛋白石,  $\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ )的硅质胶结作用使天然硅藻土具有较高的结构强度。扫描电镜观察还发现,在一些硅藻碎屑的边缘发生了向蒙脱石转化现象,这是微碱性富  $\text{Mg}^{2+}$  环境下脱硅作用的产物。

综合颗粒分析、黏粒 XRD 测试、岩石化学分析、扫描电镜观察等多种测试结果,腾冲芒棒盆地硅藻土的硅藻残骸含量大致在 50%~65% 之间变化,其黏土矿物含量 31%~46%,因此,芒棒盆地硅藻土的确切定名应为黏土质硅藻土。

表 2 黏土质硅藻土黏土矿物成分定量测试结果

Table 2 X-ray diffraction analysis results of the <2 $\mu\text{m}$  fractions of clayey diatomite

样品号	位置	黏土矿物相对含量/(%)					混层比/(%)	<2 $\mu\text{m}$ /(%)	黏土矿物绝对含量				
		S	I/S	I	K	C			S	I/S	I	K	C
G02	五合乡驻地南		74	3	23		65	31.04	22.97	0.93	7.14		
G04-2	团田乡蛮帕硅藻土矿		53	15	32		60	34.88	18.49	5.23	11.16		
G05-1	团田乡曼弄保腾高速		28	18	54		45	46.16	12.92	8.31	24.93		
G06	芒棒南公路边取土坑		33	23	44		50	35.68	11.77	8.21	15.70		

注: S. 蒙脱石; I/S. 伊利石/蒙脱石混层矿物; I. 伊利石; K. 高岭石; C. 绿泥石

表3 云南腾冲黏土质硅藻土与国内外硅藻土化学成分对比/(%)

Table 3 Chemical compositions of clayey diatomite from Tengchong and its comparison with those from other areas

地点	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	烧失量
云南腾冲五合	56.01	20.59	3.99	0.58		1.65	1.65	1.92	1.92	10.93
吉林长白	92.75	2.57	0.50			0.24	0.19			2.39
吉林抚松	91.30	3.27	0.62			0.27	0.29			3.69
山东临朐	74.56	3.04	3.94			1.37	0.83			5.66
浙江嵊县	64.80	16.40	2.91			0.33	0.15			3.10
湖北随县	74.70	5.40	2.75							
四川米易新民	67.68	17.06	1.94			0.80	1.64			5.23
云南寻甸先锋	50.20	10.38	7.09	1.09		2.68	1.26		1.19	23.88
美国加州	89.70	3.72	1.09	0.10	0.10	0.30	0.55	0.31	0.41	3.70
美国内华达州	86.00	5.27	2.12	0.21	0.06	0.34	0.39	0.24	0.29	4.90
美国爱达荷州	89.82	1.82	0.44	0.07	0.13	1.26	0.54	1.03	0.22	4.02
科尼亚	84.50	3.06	1.86	0.17	0.04	1.80	0.39	1.19	0.91	6.08
日本	86.00	5.80	1.60	0.22	0.03	0.70	0.29	0.48	0.53	4.40
前苏联	79.92	6.58	3.56	0.48	—	1.43	0.98	0.65	0.72	4.91
西班牙	88.60	0.62	0.20	0.05	—	3.00	0.81	0.50	0.39	5.20
墨西哥	91.20	3.20	0.70	0.16	0.05	0.19	0.42	0.13	0.24	3.60
阿尔及利亚	58.40	1.66	1.55	0.10	0.20	13.80	4.57	0.96	0.50	17.48

注:除云南腾冲五合测试结果外,其余引自田煦等(1986)<sup>[2]</sup>、谷白漭等(1994)<sup>[12]</sup>。

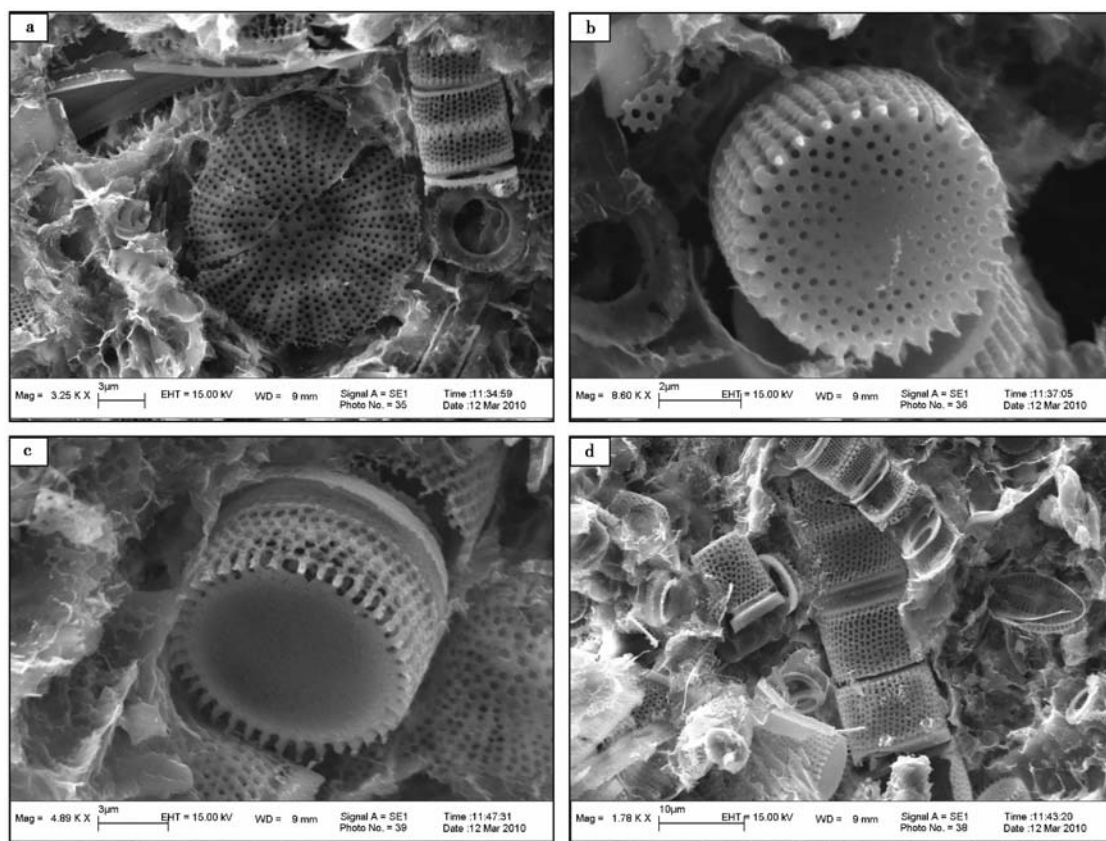


图4 扫描电镜下的黏土质硅藻土微观结构特征

Fig. 4 SEM microstructures of the clayey diatomites

## 4 黏土质硅藻土的工程地质特性

### 4.1 物理和水理性质

根据野外观测,腾冲芒棒盆地硅藻土一般呈灰白色、土黄色和灰黑色,在物理性状上最显著的特征是质轻、细腻。室内测试结果表明(表4),其密度一般仅为  $1.16 \sim 1.41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,干密度为  $0.62 \sim 0.75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。即密度极小,在干燥状态下可漂浮于水中。

测试结果还表明,芒棒盆地的黏土质硅藻土具有硅藻土与典型膨胀性黏土质岩土双重物理和水理性质,前者表现为极高的孔隙性、高吸水性、极强的结构性,含水量达  $85\% \sim 113\%$ ,孔隙比  $2.2 \sim 2.8$ ,液性指数  $0.66 \sim 2.73$ ;后者则表现为高塑性、显著的膨胀崩解性。因此,腾冲的黏土质硅藻土属于一种成分性质极为特殊的膨胀性岩石。黏土质硅藻土的书页状张裂扩展现象(图5),说明其膨胀性具有显著的各向异性。

### 4.2 膨胀特性分析

采用岩块干燥饱和吸水率指标进行泥质岩膨胀势的工程分级是一种快速适用的分级指标<sup>[10]</sup>。虽然纯度高的天然硅藻土在水中不具膨胀、崩解现象,但因其高孔隙性仍具有很高的吸水率,因此采用这一指标进行判别失去了意义。而采用粉末样品的自由膨胀率法判别黏土膨胀势,因骨架密度低,

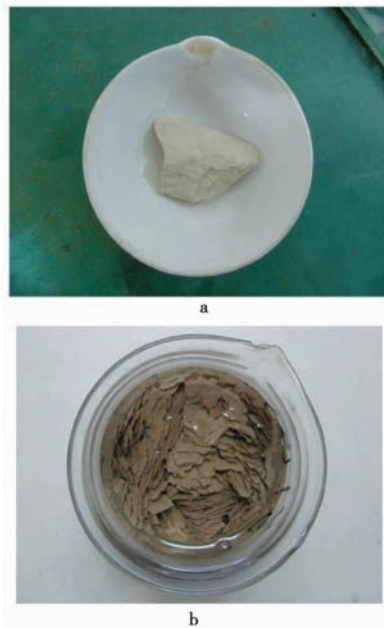


图5 硅藻土干燥岩块浸水前后性状变化对比

Fig. 5 Comparison of the characteristic of the dried clayey diatomite before and after soaking  
a. 浸水前干燥岩块; b. 浸水后书页状张裂

<0.5mm粉状物的体密度往往很小且不均一。测试结果与岩块性状差异很大,亦不适用。因此,黏土质硅藻土膨胀势的定量判别目前尚无合适的方法。作者认为,采用原状试件测定干湿作用下体积变化是反映收缩和膨胀特性最直接的方法,故采用厚2cm的圆形试件,测试了微荷( $1.17 \sim 1.25 \text{ kPa}$ )作用下黏土质硅藻土的膨胀特性(表5),结果表明:

表4 芒棒组黏土质硅藻土物理水理性质测试结果

Table 4 Test results of the physical-hydraulic properties of the clayey diatomite samples

样品编号	地点	名称及特征	含水量/(%)	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	比重	孔隙比	塑限/(%)	液限/(%)	塑性指数	液性指数	干岩块浸水后性状	岩块干燥饱和吸水率/(%)
G02	五合乡 驻地南侧 公路边坡	灰白色 硅藻土	22.43*	1.18*	0.964*			86.26	35.96	50.30		书页状 张开、泥状	103.07
G02-1		灰白色、 质极轻	84.86									书页状 张开、泥状	119.12
G02-2		黑色、 质极轻	88.29	1.16	0.62	2.28	2.68	108.18	50.56	57.62	0.66	碎片状、 软化	109.43
G04-2	团田乡蛮 帕硅藻土矿	灰黑色、质极轻	42.80*	1.18*	0.87*			100.52	55.85	44.67		碎裂、 不软化	70.82
G05-1	团田乡 曼弄保腾 高速路边坡	土黄色、 质极轻	107.43	1.37	0.66	2.41	2.65	98.08	39.92	52.16	1.29	书页状 张裂、泥状	87.70
G05-2		灰白色、 质极轻	113.25	1.37	0.64	2.42	2.78	66.13	38.91	27.22	2.73	书页状 张裂、泥状	109.23
G06	芒棒乡南公 路边取土坑	土黄色、 质极轻	92.85	1.27	0.66	2.39	2.62	87.87	40.75	47.12	1.11	书页状 张裂、泥状	129.40
G07	芒棒乡张家 村公路边坡	土黄色、 质极轻	87.68	1.41	0.75	2.40	2.20	98.43	55.36	43.07	0.75	书页状 张裂、泥状	111.11

注: \* 为风干样品数据。

表5 黏土质硅藻土微荷(1.17~1.25kPa)下膨胀率测试结果

Table 5 the swelling ratio of clayey diatomite under lower loads from 1.17 to 1.25 kPa

样品编号	取样地点	颜色	含水量/(%)	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	干密度/ $g \cdot cm^{-3}$	有机质/(%)	体缩率/(%)	膨胀率/(%)	胀后含水量/(%)
G04-2	团田乡奎帕硅藻土矿	深灰色	42.8	1.18	0.83	1.93	1.61	0	
G05-4	团田乡曼弄保腾高速边坡	灰白色	113.25	1.37	0.64	0.23	20.14	4.64	38.79
G05-1	团田乡曼弄保腾高速边坡	土黄色	107.43	1.37	0.66	0.16	18.40	4.68	62.33
G06	芒棒南公路边取土坑	土黄色	92.85	1.27	0.66	0.10	11.85	29.77	107.97

(1) 4个黏土质硅藻土样品中,有3个发生了显著的体缩,体缩率达11.85%~20.14%,体缩率大小与初始含水量高低密切相关。收缩稳定后的黏土质硅藻土样品在微荷作用下浸水,均产生明显的体积膨胀,其中未风化样品的膨胀率4.64%~4.68%,而取自芒棒乡南公路边取土坑的弱风化样品膨胀率高达29.77%,说明风化后的黏土质硅藻土不仅发生明显的高岭石化作用,而且硅质胶结作用发生弱化,从而导致膨胀变形的增大(图6)。

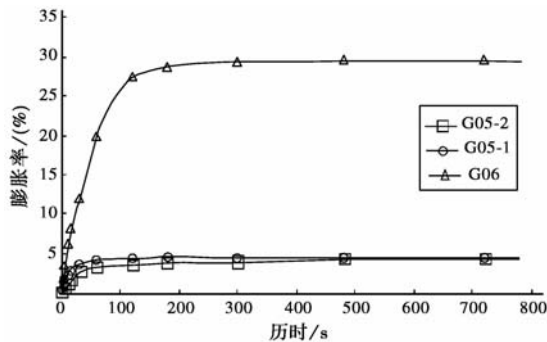


图6 微荷下硅藻土不同历时膨胀率曲线图

Fig. 6 The swelling ratio curves of clayey diatomite samples in different time under lower loads

(2) 测试分析发现,芒棒地区黏土质硅藻土的膨胀崩解特性与有机质的胶结作用密切相关:有机质含量高,胶结作用强,则膨胀崩解现象不明显;反之,则膨胀性明显。团田乡奎帕深灰色黏土质硅藻土样品有机质含量达1.93%,其不仅体缩率小,而且在微荷作用下不发生体积膨胀变形,属于非膨胀性的黏土质硅藻土。这说明,并非所有的黏土质硅藻土均具有膨胀性,只有那些有机质胶结物含量低的灰白、土黄等浅色黏土质硅藻土才具有膨胀性,并且这类黏土质硅藻土可因化学风化作用导致膨胀性明显增加、强度明显降低。

(3) 与南水北调中线工程上第三系硬黏土相比,腾冲黏土质硅藻土虽在黏粒含量、比表面指标上十分相近<sup>[13]</sup>,但其膨胀性并不强,原因除了硅质胶

结作用外,也与其极高的孔隙性有关。黏土质硅藻土膨胀性黏土矿物的膨胀大多消耗在孔隙体积的减少上,可称为“内膨胀”,因而形成不了很高的膨胀力。但其膨胀作用可导致内部结构发生破坏,使其从弹性向塑性转化,从而导致一系列工程地质问题的发生。

## 5 膨胀性硅藻土研究的意义

作为一种特殊岩土类型,膨胀性黏土质硅藻土的发现及其工程特性研究具有重要的理论和工程实际意义,主要体现在以下方面:

(1) 通常,当硅藻土中硅藻含量超过50%时,可视为具有经济价值的硅藻土矿。当硅藻土中黏土矿物含量较高或经后期蒙脱石化作用形成较多黏土矿物时,则成为工程性质较差的特殊性岩土类型(轻质膨胀岩)。目前,关于黏土质硅藻土作为膨胀岩(土)的界定,即膨胀性黏土矿物的临界含量是多少,目前尚无定论,因此对膨胀性硅藻土的研究,有助于丰富膨胀性岩土相关理论和研究内容。

(2) 云南腾冲膨胀性黏土质硅藻土工程特性的研究,可以促进对中国西南地区某些湖相地层工程特性及地质灾害多发原因的认识。例如,四川西昌—攀枝花地区的昔格达层是著名的易滑地层和膨胀性岩土层<sup>[14, 15]</sup>,以往研究中对攀枝花市大田盆地昔格达层干密度低(0.99~1.15 $g \cdot cm^{-3}$ )、蒙脱石含量高(23.65%~25.51%)的成因,百思不得其解。而本文黏土质硅藻土的研究对上述昔格达层特殊工程特性的成因有很大的启示意义。

(3) 在云南腾冲龙川江流域,与黏土质硅藻土不良工程特性相关的地质灾害频繁发生。例如,在建的保山—腾冲高速公路沿线存在多处与黏土质硅藻土有关的滑坡现象。黏土质硅藻土在风化或扰动后结构发生变化,其膨胀性得以充分显现,在不同的斜坡结构条件下会出现一系列边坡失稳现象,顺层滑坡尤其发育。此外,黏土质硅藻土公路边坡表面



还因干燥失水发生显著的体缩现象,在坡面形成密集的网状收缩裂隙,在坡脚处堆积大量风化剥落碎屑,形成边坡工程中的风化危害(图7)。因此,对黏土质硅藻土的研究有助于加深对保山—腾冲高速公路沿线地质灾害形成机理的认识,从而提高地质灾害防治效果。

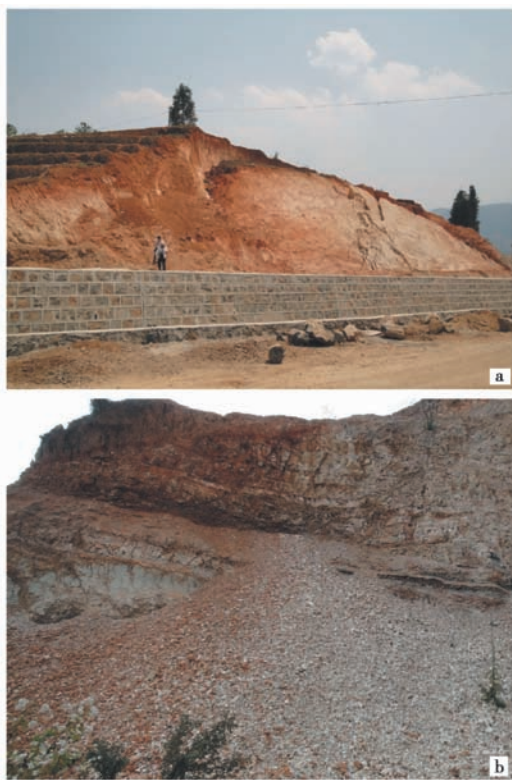


图7 黏土质硅藻土边坡的滑坡(a)和风化剥落(b)

Fig. 7 Slope rockslide and weathered debris related with clayey diatomite

(4)硅藻土因特殊的结构性和力学性质,成为近年来岩土力学研究者进行结构性研究的对象<sup>[4, 5, 7, 16, 17]</sup>。本文的初步研究表明,硅藻土含水量高—极高,最大可达113.25%,这是一般硬塑性黏土、岩土体所没有的,可与“豆腐”的含水量相比,而现场调查表明其硬度堪比“冻豆腐”(其单轴抗压强度通常 $\geq 1.0\text{MPa}$ ),如此高的结构强度与硅藻土的黏粒含量高、有机质胶结、硅质胶结具有重要的关系,但在扰动后硅藻土的结构强度丧失。对这些问题的研究将推动岩土力学理论发展,并促进岩土工程应用。

## 6 结 论

本文通过野外调查和室内试验,揭示了云南腾冲芒棒盆地的黏土质硅藻土属于一种轻质强膨胀性极软岩,并对其分布特征、物质组成和主要工程地质特性进行了初步研究,取得以下主要认识:

(1)芒棒盆地上新世湖相成因的黏土质硅藻土,具有颗粒细腻、高孔隙性、高吸水率和比表面积大等特点。

(2)芒棒盆地黏土质硅藻土的黏土矿物成分为伊/蒙混层矿物、伊利石、高岭石的共生组合,伊/蒙混层矿物占主导地位,因而表现出显著的膨胀特性。有机质对硅藻土的膨胀性具有重要的影响,随着有机质含量的增加,硅藻土的膨胀势明显降低。黏土质硅藻土的高孔隙性决定了其膨胀性具有显著的“内膨胀”特点。

(3)特殊的物质成分和结构联结作用导致黏土质硅藻土的湿度、密度、稠度状态指标、水理性质、变形破坏规律等与传统的岩土力学理论和规律都明显不同。现行膨胀岩和膨胀土的判别指标不适用于黏土质硅藻土膨胀势的判别,因为非膨胀性硅藻土亦具有很高的吸水率。建议通过膨胀崩解及泥化现象来进行初判,也可采用微荷(1.17~1.25kPa)作用下的膨胀率测试进行鉴别。

(4)云南腾冲芒棒盆地膨胀性硅藻土的发现及其工程特性的研究,有助于加深对保山—腾冲高速公路沿线地质灾害形成机理的认识,对揭示中国西南地区某些湖相地层工程特性及地质灾害多发原因也具有重要的启示意义。同时,对膨胀性硅藻土工程特性的深入研究,还将推动岩土力学理论发展,并促进岩土工程应用。

值得指出,本文对芒棒盆地黏土质硅藻土的工程地质特性仅进行了初步分析,对上新世黏土质硅藻土膨胀特性的变化规律还有待深入研究(邻区还有第四纪硅藻土分布,可进行对比研究)。关于芒棒盆地黏土质硅藻土的强度和变形规律将另文阐述。

## 参 考 文 献

- [1] 刘宝珺. 沉积岩石学[M]. 北京:地质出版社,1980,p226.  
Liu Baojun. Sedimentary Petrology. Beijing: Geological Publishing House, 1980, p226.

- [2] 田煦, 周开灿, 文化川. 非金属矿地质学[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1989, p326 ~ 335.  
Tian Xu, Zhou Kaican, Wen Huachuan. Geology of Nonmetallic Mineral Resources. Wuhan: Wuhan Institute of Industry Press, 1989, p326 ~ 335.
- [3] 崔越昭. 中国非金属矿业[M]. 北京: 地质出版社, 2008, p138 ~ 142.  
Cui Yuechao. China Non-metallic Industry. Beijing: Geological Publishing House, 2008, 138 ~ 142.
- [4] Day RB. Engineering properties of diatomaceous fill. Journal of Geotechnical Engineers Division, American Society of Civil Engineers, 1995, **121**(12): 908 ~ 910.
- [5] Tateishi Y. Geotechnical properties of diatom earth and stability of surface layer for the cut slope. Doctoral Thesis, Saga University, 1997.
- [6] 胡书毅, 文玲. 山东临朐第三纪硅藻土的微观特征[J]. 电子显微学报, 2005, **24**(4): 319 ~ 319.  
Hu Shuyi, Wen Ling. Microcosmic characteristic of diatomite of tertiary for Linqu, Shandong. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2005, **24**(4): 319 ~ 319.
- [7] 洪振舜, 立石义孝, 邓永锋. 天然硅藻土的应力水平与孔隙空间分布的关系[J]. 岩土力学, 2004, **25**(7): 1023 ~ 1026.  
Hong Zhenshun, Tateishi Yoshitaka, Deng Yongfeng. Relationship between entrance pore distribution and stress level of natural sedimentary diatomaceous soil. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(7): 1023 ~ 1026.
- [8] 高华喜, 殷坤龙, 周春梅. 硅藻土滑坡稳定性分析及其时间预报[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2007, **37**(1): 127 ~ 130.  
Gao Huaxi, Yin Kunlong, Zhou Chunmei. Diatomite landslides stability analysis and time forecast. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2007, **37**(1): 127 ~ 130.
- [9] Commission on Swelling Rock, ISRM. Characterization of Swelling Rock, 1983.
- [10] 曲永新, 张永双, 杨俊峰, 等. 中国膨胀性岩、土一体化工程地质分类的理论与实践[C]. 中国工程地质五十年[M]. 北京: 地震出版社, 2000, 140 ~ 164.  
Qu Yongxin, Zhang Yongshuang, Yang Junfeng, et al. Theory and practice on engineering geological classification of swelling rock and soil in China. In: 50 Years of Engineering Geology in China. Beijing, Seismologic Press, 2000, p140 ~ 164.
- [11] 尚映莲. 腾冲硅藻土矿床及其成因[J]. 云南地质, 2003, **22**(4): 418 ~ 425.  
Shang Yinglian. Tengchong diatomite deposit and its genesis. Yunnan Geology, 2003, **22**(4): 418 ~ 425.
- [12] 谷白湮, 周义平. 云南省寻甸先锋盆地中新世褐煤与硅藻土沉积特征[J]. 地质评论, 1994, **40**(5): 466 ~ 475.  
Gu Baiyan, Zhou Yiping. The sedimentary characteristics of the Miocene lignite and diatomite in Xianfeng Basin, Xundian, Yunnan. Geological Review, 1994, **40**(5): 466 ~ 475.
- [13] 张永双, 曲永新, 周瑞光. 南水北调中线工程上第三系膨胀性硬黏土的工程地质特性研究[J]. 工程地质学报, 2002, **10**(4): 367 ~ 377.  
Zhang Yongshuang, Qu Yongxin, Zhou Ruiguang. Engineering geological properties of Neogene hard clay along the middle line of the north ~ south diversion water project in China. Journal of Engineering Geology, 2002, **10**(4): 367 ~ 377.
- [14] 曲永新, 吴芝兰. 渡口市的昔格达层滑坡及其地质灾害[C]. 地面岩体工程加固新进展[M]. 北京: 中国科技出版社, 1992, p22 ~ 26.  
Qu Yongxin, Wu Zhilan. Landslide related with the Xigeda Formation and its geological disaster in Dukou city. In: New Advances on Ground Rock Reinforcement. Beijing: China Science and Technology Publishing House, 1992, p22 ~ 26.
- [15] 曲永新, 于锁龙. 渡口市的膨胀土[C]. 中国首届膨胀土科学研讨会论文集[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1990, p99 ~ 111.  
Qu Yongxin, Yu Suolong. Expansive soil from Dukou city. in: Proceeding of China's First Scientific Symposium on Expansive Soil. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1990, p99 ~ 111.
- [16] Yoshinaka R. Mechanical properties for sedimentary soft-rocks. Tokyo: Edited by Committee of Sedimentary Soft Rocks in Geotechnical Engineering, Japanese Society of Soil Mechanical and Foundation Engineering, 1987, 69 ~ 116.
- [17] 胡瑞林, 官国琳, 李向全. 黄土湿陷性的微结构效应. 工程地质学报, 1999, **7**(2): 161 ~ 167.  
Hu, Ruilin, Guan Guolin, Li Xiangquan. Microstructure effect on the subsidence of loess. Journal of Engineering Geology, 1999, **7**(2): 161 ~ 167.